

Télédétection et caractéristiques physiques des dépôts meubles dans un milieu anciennement englacé du sud du Québec

Remote Sensing and Physical Characteristics of Surficial Deposits in a Former Glaciated Area, Southern Québec

Télédétection und physische Charakteristiken der oberflächen Ablagerungen in einer Früher vereisten Gegend im Südlichen Québec

Pierre Clément, Ferdinand Bonn et Jean-Marie M. Dubois

Volume 37, numéro 1, 1983

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032502ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032502ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Clément, P., Bonn, F. & Dubois, J.-M. M. (1983). Télédétection et caractéristiques physiques des dépôts meubles dans un milieu anciennement englacé du sud du Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 37(1), 107–117.
<https://doi.org/10.7202/032502ar>

Résumé de l'article

L'analyse géomorphologique à partir de bandes spectrales débordant le rayonnement visible est encore au stade expérimental. La stratigraphie et la structure interne des dépôts meubles ne peuvent être directement détectées, mais la granulométrie et les formes de surface peuvent l'être. Dans le cas des surfaces dénudées, la granulométrie est reliée à la réflectance dans le visible et le proche infrarouge et à la rugosité détectable par le radar. Dans le cas des surfaces recouvertes de végétation, la granulométrie peut être déduite indirectement des conditions d'humidité des sols, qui commandent l'alimentation en eau des plantes, dans le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge thermique, le radar (constante diélectrique) et théoriquement les micro-ondes passives. Sans compter la traditionnelle photointerprétation stéréoscopique, les formes de surface peuvent être reconnues soit de façon automatisée, surtout dans le cas des formes linéaires, lorsque l'on possède des documents numérisés, soit de façon visuelle par rehaussement d'image lors de la prise de vue (radar, thermographies). Les formes de surface peuvent aussi être rehaussées au moment du traitement par incorporation d'un modèle numérique de terrain ou avec des images de composantes spectrales. Des expériences ont été conduites en Estrie afin de distinguer les tills des dépôts fluvioglaciaires ou glacio-lacustres. Il en résulte que l'imagerie la plus efficace dans le cas d'une analyse visuelle est l'infrarouge thermique diurne en automne quand les effets de l'insolation sur la topographie sont maximaux et où ceux des écarts d'albédo sont réduits.

TÉLÉDÉTECTION ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES DÉPÔTS MEUBLES DANS UN MILIEU ANCIENNEMENT ENGLACÉ DU SUD DU QUÉBEC

Pierre CLÉMENT, Ferdinand BONN et Jean-Marie M. DUBOIS, Département de géographie et Institut d'aménagement, université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec J1K 2R1.

RÉSUMÉ L'analyse géomorphologique à partir de bandes spectrales débordant le rayonnement visible est encore au stade expérimental. La stratigraphie et la structure interne des dépôts meubles ne peuvent être directement détectées, mais la granulométrie et les formes de surface peuvent l'être. Dans le cas des surfaces dénudées, la granulométrie est reliée à la réflectance dans le visible et le proche infrarouge et à la rugosité détectable par le radar. Dans le cas des surfaces recouvertes de végétation, la granulométrie peut être déduite indirectement des conditions d'humidité des sols, qui commandent l'alimentation en eau des plantes, dans le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge thermique, le radar (constante diélectrique) et théoriquement les micro-ondes passives. Sans compter la traditionnelle photointerprétation stéréoscopique, les formes de surface peuvent être reconnues soit de façon automatisée, surtout dans le cas des formes linéaires, lorsque l'on possède des documents numérisés, soit de façon visuelle par rehaussement d'image lors de la prise de vue (radar, thermographies). Les formes de surface peuvent aussi être rehaussées au moment du traitement par incorporation d'un modèle numérique de terrain ou avec des images de composantes spectrales. Des expériences ont été conduites en Estrie afin de distinguer les tills des dépôts fluvioglaciaires ou glacio-lacustres. Il en résulte que l'imagerie la plus efficace dans le cas d'une analyse visuelle est l'infrarouge thermique diurne en automne quand les effets de l'insolation sur la topographie sont maximaux et où ceux des écarts d'albédo sont réduits.

ABSTRACT *Remote sensing and physical characteristics of surficial deposits in a former glaciated area, southern Québec.* Geomorphologic analysis based on or using spectral bands beyond the visible is still at an experimental stage. If stratigraphy and internal structure of surficial deposits cannot be directly detected, grain size and surface landforms are detectable, however. In the case of non vegetated areas, grain size is related to visible and near infrared reflectance, and to surface roughness detectable by airborne radar. In the case of vegetated surfaces, grain size can be inferred indirectly from soil moisture conditions which are detectable in the visible, near infrared, thermal infrared, radar (dielectric constant) and theoretically in the passive microwave spectral ranges. Besides traditional stereoscopic photointerpretation, surface landforms, especially linear ones, can be recognized either automatically, if digital data are available, or visually through enhancements generated in numerical analysis by data acquisition methods (radar, thermography). Surface landforms can also be enhanced by incorporation of a digital terrain model or by principal component enhancement. Experiments have been conducted in the Eastern Townships of Québec, in order to distinguish glacial tills from fluvioglacial or lacustrine deposits. The most efficient imagery for this purpose, using visual analysis, is daytime thermal infrared, acquired during the Fall, when insolation effects on topography are greatest and albedo variations are least.

ZUSAMMENFASSUNG *Teledetection und physische Charakteristiken der oberflächen Ablagerungen in einer Früher vereisten Gegend im Südlichen Québec.* Geomorphologische Analyse die sich auf den Gebrauch, von ausserhalb des Sichtbaren liegenden spectralen Streifen gründet, ist noch im Experimentalstadium. Wenn auch Stratigraphie und innere Struktur der Oberflächen Ablagerungen nicht direkt untersucht werden können, sind jedoch Korngrösse und Oberflächen Landformen untersuchbar. Im Falle von nicht Vegetations gedeckten Gegenden, ist die Korngrösse verbunden mit der sichtbaren und nah-infraroten Reflektanz und mit der Oberflächen Rauheit, welche mit dem Radar detektiert werden kann. Im Falle von Vegetations bedeckten Gegenden kann die Korngrösse durch die Bodenfeuchtigkeits Verhältnisse, welche durch die sichtbaren, nah-infraroten, thermal infraroten, Radar (dielektrische Konstante) und theoretisch in dem passiven Mikrowellen spektral Raum, angenommen werden können. Neben der traditionellen stereoskopischen Photointerpretation, Oberflächenlandformen, besonders lineäre, können entweder automatisch erkannt werden, wenn digital Daten vorhanden sind, oder visuell, durch das Erheben des Bildes bei der Aufnahme (Radar, Thermographie). Die Oberflächenformen können auch verbessert werden durch das Einschliessen von digitalen Terrain-Modellen oder durch Hauptkomponenten Verbesserung. In den Cantons de l'Est in Québec, wurden Experimente durchgeführt, um glazialen Till von fluvioglazialen oder lakustrinen Ablagerungen zu unterscheiden. Es ergibt sich, dass die leistungsfähigsten Abbildungen für eine visuelle Analyse vom thermischen, Tagesinfrarot stammen im Herbst, wenn die Einflüsse der Sonnenbestrahlung auf die Topographie am grössten sind, und die der albedo Abweichungen reduziert sind.

INTRODUCTION

La découverte depuis quelques années de nouvelles techniques d'observation de la terre, à partir de plates-formes aéroportées ou spatiales utilisant comme signal des bandes spectrales débordant largement le rayonnement visible, a considérablement élargi notre équipement d'outils pour l'observation du milieu naturel. Les premières applications de ces nouvelles techniques ont d'abord été l'étude de l'utilisation du sol et de la végétation au moyen de diverses techniques d'analyse automatisée s'appuyant sur les signatures spectrales des objets. Les techniques d'applications géomorphologiques sont apparues moins rapidement, et, pour une grande part, ne sont pas encore opérationnelles, sauf pour la reconnaissance de formes linéaires reliées à la fracturation du substratum rocheux, qui peut se faire de façon automatisée. La cartographie des dépôts meubles, qui est un préalable à toute étude géomorphologique dans un milieu anciennement englacé comme les Appalaches du Québec, pourrait gagner en précision et en rapidité par une utilisation adéquate de certains documents de télédétection, dans la mesure où ceux-ci sont bien choisis et utilisés à bon escient. Dans une première partie, nous allons donc brièvement évoquer les relations entre certaines caractéristiques physiques des dépôts meubles et les bandes spectrales les plus couramment utilisées en télédétection, puis nous verrons à l'aide d'exemples, dans une deuxième partie, comment une analyse visuelle de certains documents peut augmenter notre connaissance des dépôts meubles dans un secteur relativement bien connu. Enfin, nous terminerons par une description sommaire des futurs satellites de télédétection et de leurs possibilités en géomorphologie.

LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES DÉPÔTS MEUBLES DÉTECTABLES À DISTANCE

Les caractéristiques physiques des dépôts meubles habituellement utilisés pour l'interprétation géomorphologique sont la granulométrie, la structure, la stratigraphie et la topographie de surface. Il est évident qu'il n'y a pas de méthode de télédétection qui puisse donner directement des indications sur la structure interne et la stratigraphie d'un dépôt, mais la granulométrie et les formes de surface se manifestent par des propriétés physiques détectables à distance.

1. DÉTECTION DES PROPRIÉTÉS GRANULOMÉTRIQUES

La granulométrie des dépôts meubles se manifeste soit de façon directe, quand la couverture végétale et les sols qui en dérivent sont faibles ou inexistantes, soit de façon indirecte, par l'intermédiaire des conditions de drainage qui commandent l'humidité de surface.

a) La détection directe

De bonnes conditions de détection directe sont rarement présentes dans des régions à forte couverture végétale, comme au sud du Québec. Elles sont cependant réunies dans les secteurs où la dynamique actuelle empêche la colonisation par la végétation (littoraux, bancs alluvionnaires, dunes actives, cicatrices de glissement) ou dans les champs fraîchement labourés.

Dans les cas de détection directe, il y a une relation entre la granulométrie du dépôt et sa réflectance dans le visible et le proche infrarouge : plus le dépôt est fin, plus sa réflectance entre 0,5 et 1,1 μm est élevée, à pétrographie et teneur en eau égales. Cette constatation doit cependant être nuancée pour les argiles : l'état de floculation de celles-ci peut donner en surface une granulométrie apparente plus grossière, qui abaisse ainsi la réflectance mesurée sur le terrain par rapport à celle mesurée en laboratoire et peut rendre une argile moins réfléchissante qu'un sable (GIRARD et GIRARD, 1975).

La granulométrie commande également la rugosité de surface, qui est une des deux propriétés commandant la rétrodiffusion des ondes radar, l'autre étant la constante diélectrique (fig. 1). En utilisant le critère de Rayleigh (SABINS, 1978) une surface est considérée comme lisse¹ par rapport à une onde radar si :

$$h < \frac{\lambda}{25 \sin \gamma} \quad (1)$$

où : h est la hauteur des irrégularités de la surface, soit la rugosité, qui dans le cas d'un dépôt meuble exposé peut être assimilée à la granulométrie moyenne,

λ est la longueur d'onde du radar,

γ est l'angle de dépression de l'onde radar incidente par rapport à l'horizontale.

Dans le cas d'un radar à bande x ($\lambda = 3 \text{ cm}$), pour un angle de 45°, une surface apparaîtra lisse si sa granulométrie moyenne est inférieure à 0,17 cm, ce qui correspond environ à la limite des sables et des graviers (0,2 cm) selon CAILLEUX et TRICART (1963). Pour une bande L ($\lambda = 30 \text{ cm}$), comme celle utilisée sur Seasat, cette limite sera de 1,7 cm et pour une bande C (prévue sur Radarsat en 1990), elle sera de 0,34 cm.

D'autre part, en utilisant le critère de Rayleigh modifié par PEAKE and OLIVER (1971), on considère qu'une surface est rugueuse par rapport aux ondes radar quand la diffusion du signal incident est totale, ce qui se traduit par :

$$h > \frac{\lambda}{4,4 \sin \gamma} \quad (2)$$

1. Une surface lisse par rapport à l'onde radar est une surface qui renvoie tout le signal reçu de façon spéculaire, c'est-à-dire que le signal rétrodiffusé sera nul et que la surface apparaîtra en noir sur les images.

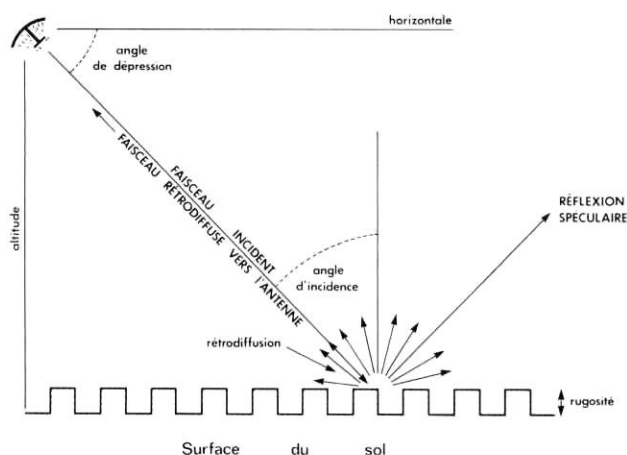


FIGURE 1. Principaux paramètres intervenant dans l'analyse des images radar latéral (d'après SABINS, 1978).

Main parameters for the analysis of a side scanned radar image (adapted from SABINS, 1978).

Dans ce cas, la rétrodiffusion sera maximale et, si les conditions sont identiques au cas précédent, la surface apparaîtra rugueuse, ou en blanc sur les images, si la granulométrie est supérieure à 0,97 cm pour la bande x, ou à 9,7 cm pour la bande L, ou à 1,94 cm pour la bande C.

Les teintes de gris des images radar sur des alluvions ou des dépôts exposés et secs devraient donc théoriquement permettre de cartographier des variations granulométriques des galets et graviers entre 2 mm et 10 cm en moyenne, mais avec certaines limites.

b) La détection indirecte

Comme les dépôts meubles sont généralement recouverts par des sols et de la végétation, la détection des propriétés granulométriques ne peut donc être qu'indirecte. Elle nécessite donc une connaissance des relations existant entre le drainage, la géomorphologie et l'alimentation en eau des végétaux qui en est souvent le reflet (IDSO et EHLER, 1976). La détection devient donc indirecte. Elle implique une approche multidisciplinaire, exigeant de l'interprète à la fois une connaissance approfondie des relations climat-végétation-sol-dépôt meuble et de l'interaction entre le phénomène étudié et l'onde électromagnétique, cette dernière portant l'information de la surface du sol au capteur aéroporté.

Or, la formation traditionnelle des géomorphologues ou des physiciens de la télédétection ne les prépare pas à ce genre d'étude de relations complexes, souvent encore mal connues. De plus, le résultat qui se manifeste en fin de compte sous la forme d'une teinte de gris sur une photographie ou d'un chiffre sur un document numérique peut être très difficile à interpréter, même si l'on sait qu'il contient effectivement l'information recherchée.

— Dans le visible et le proche infrarouge, il est habituellement possible d'identifier les espèces végétales et de détecter les conditions qui commandent leur métabolisme, dont le drainage au niveau des racines est un des aspects reliés au type de dépôt meuble sous-jacent. Cette analyse de la végétation peut se faire de façon automatisée, si on inclut dans le processus une correction topographique à partir d'un modèle numérique de terrain (ROCHON *et al.*, 1979; STRAHLER *et al.*, 1978). Mais l'interprétation géomorphologique ne peut être réalisée que d'une façon manuelle (CIHLAR, 1979), car le nombre des paramètres entrant en ligne de compte est trop important pour pouvoir faire abstraction du jugement du photointerprète, même si le document interprété est le résultat d'un traitement numérique du type classification (supervisée ou non) ou du type image rehaussée (par exemple par composantes principales).

Dans nos régions, les photographies infrarouges-couleurs prises au début du printemps sont particulièrement utiles pour la détection des conditions de drainage en surface, en particulier dans les zones cultivées où le sol est encore nu (LADOUCEUR, 1978).

— Dans l'infrarouge thermique, le potentiel de reconnaissance des conditions de drainage reliées à la granulométrie est particulièrement important. On s'appuie dans ce domaine sur les variations de la chaleur spécifique volumétrique du sol, exprimée par la relation de DeVries (VAN VIJCK, 1963) :

$$\rho C = 0,46 \theta_m + 0,6 \theta_o + \theta_w \quad (3)$$

où ρ est la densité du matériau,
C est la chaleur spécifique par unité de masse,
 θ_m est la teneur en matière minérale (volumétrique),
 θ_o est la teneur en matière organique (volumétrique),
 θ_w est la teneur en eau (volumétrique).

Les variations de la chaleur spécifique, reliées aux variations de la teneur en eau, peuvent être détectées à distance par l'intermédiaire de l'inertie thermique du dépôt, exprimée par :

$$P = \sqrt{k\rho C} \quad (4)$$

où k est la conductivité thermique du matériau.

L'inertie thermique peut être détectée à distance au moyen d'un algorithme simple qui donne une image d'inertie thermique apparente, en utilisant des thermographies diurnes et nocturnes, ainsi qu'une mesure d'albédo qui peut être dérivée de photographies aériennes (PRICE, 1977; BERNIER et BONN, 1979; KAHLE, 1977; BERNIER, 1981). Elle est exprimée par :

$$ATI = C \frac{1 - \alpha}{T_j - T_n} \quad (5)$$

où ATI est l'inertie thermique apparente,
C est une constante dépendant de la latitude et de la déclinaison solaire,
 α est l'albédo (mesuré à partir de photographies aériennes)
 T_j est la température de jour de la surface,

T_n est la température de nuit de la surface, les températures étant mesurées à partir des thermographies.

L'application du concept d'inertie thermique a donné de bons résultats pour la détection des lentilles argileuses, maintenant des nappes d'eau perchées à moins de 50 cm de la surface dans un secteur alluvial irrigué en Californie (EZRA *et al.*, 1982), mais semble fonctionner moins bien quand le secteur est couvert de végétation et que l'ensemble du terrain est voisin de la saturation (BONN, BERNIER et BROCHU, 1981), ce qui est souvent le cas dans le sud du Québec. Cependant, l'interprétation visuelle des thermographies permet, si la date est bien choisie, d'identifier les secteurs à drainage rapide comme les eskers ou les terrasses de kame (CLÉMENT et BONN, 1979), en particulier parce que la température des feuilles, par l'intermédiaire du régime d'évapotranspiration, est souvent un bon indicateur de la teneur en eau au niveau des racines (IDSO et EHRLER, 1976).

— *Dans le domaine des micro-ondes passives*, il a été établi que la teneur en eau des 10 premiers centimètres du sol avait une influence directe sur le rayonnement émis à 33,6 GHz (ESTES *et al.*, 1977). Mais pour l'instant, il n'existe pas de capteur dans ces fréquences disposant d'une résolution adéquate qui puisse créer des images suffisamment précises pour une interprétation utilisable en géomorphologie. De plus, le rayonnement émis dépend de l'angle de balayage par rapport à la verticale. Des recherches dans ce domaine, menées par A. Kahle et T.J. Schmugge, sont cependant en cours en Californie afin de préciser le rôle de la rugosité et de l'humidité sur le rayonnement émis.

— *Dans le domaine des micro-ondes actives (radar)*, en dehors de la rugosité de surface déjà évoquée plus haut, le second facteur influençant la rétrodiffusion des ondes radar est la constante diélectrique du milieu. Cette constante dépend de la teneur en eau ainsi que de la disponibilité en ions libres, commandée par l'évolution pédologique du dépôt. Des travaux effectués à l'université du Kansas (ULABY *et al.*, 1978) ont montré que, dans certaines conditions de prise de vue (bande C avec angle d'incidence de 15-25°), il était possible d'éliminer presque totalement le rôle de la rugosité de surface et de la couverture végétale pour obtenir un écho dépendant uniquement de la constante diélectrique du milieu, donc essentiellement des conditions de drainage, pour des profondeurs de 5 à 15 cm. L'effet de la constante diélectrique est de réduire le pouvoir d'absorption effectif; la profondeur de pénétration varie à l'inverse de cette constante et donc cette dernière est plus grande dans les matériaux secs qu'humides (PARRY, 1973). Des survols de simulation Radarsat ont été réalisés en 1981 dans la région de Sherbrooke (Québec) dans les mêmes conditions que celles déterminées par l'équipe du Kansas, et l'analyse des premières images obtenues est en cours à l'université de Sherbrooke.

Le traitement numérique des images radar est cependant un problème très complexe, nécessitant beaucoup de temps d'ordinateur, et les analyses présentées dans la deuxième partie de cet article sont uniquement visuelles, s'appuyant sur des images plus anciennes, prises dans les bandes X et L en 1978, dans le cadre du projet Sursat.

2. DÉTECTION DES FORMES DE SURFACE

La photointerprétation classique en géomorphologie s'appuie surtout sur l'identification et l'analyse détaillée des formes de relief, mises en valeur au moyen des couples stéréoscopiques. D'autres méthodes permettent cependant de mettre en évidence des formes de détail dans le relief qui sont autant d'indicateurs géomorphologiques. Certaines de ces formes peuvent être reconnues de façon automatisée et d'autres peuvent être accentuées soit au moment de la prise de vues, soit lors du traitement des images.

a) Les formes pouvant être reconnues de façon automatique

Quand on dispose d'un document de télédétection sous une forme numérique, comme des images Landsat ou des photographies digitalisées, il est possible de reconnaître de façon automatique les formes linéaires rectilignes (linéaments) ou circulaires, au moyen de programmes appropriés (ROCHON et ROKSANDIC, 1981). Bien que ces informations soient surtout utiles à la géologie du substratum rocheux, elles permettent dans certains cas l'identification d'accidents ou de rejeux tectoniques ayant affecté les dépôts meubles. Mais l'essentiel de l'interprétation concernant les dépôts meubles repose sur l'analyse visuelle d'images.

b) Les rehaussements d'images pour l'analyse visuelle

Les détails topographiques qui revêtent souvent une grande importance pour l'analyse géomorphologique, comme les rebords de terrasses, les ravinements mineurs en sous-bois ainsi que les points d'inflexion de la pente le long des versants peuvent être rehaussés soit au moment de la prise de vues (radar à angle de dépression faible, thermographie avec un angle solaire bas), soit lors de traitements ultérieurs, en intégrant aux images un modèle numérique de terrain (ROCHON et ROKSANDIC, 1981) ou, dans le cas d'images multispectrales, en réalisant des images de composantes principales (BEAUBIEN, 1979), dont la première rehausse habituellement la topographie.

L'analyse des images rehaussées selon les besoins de l'utilisateur est alors faite de façon visuelle, mais l'utilisateur doit nécessairement intervenir au niveau du choix du type de capteur, de l'angle d'incidence souhaité ou du type de rehaussement numérique recherché. Il faut donc qu'il soit familier avec les possibilités techniques des systèmes d'analyse d'images numériques, dont un petit nombre seulement existent à l'heure

actuelle au Canada. Les exemples qui suivent sont dérivés d'analyses de documents ayant uniquement subi un rehaussement de contraste, c'est-à-dire un étalement des valeurs de gris sur l'ensemble de l'échelle disponible du noir au blanc.

APPLICATION À UN RELIEF ANCIENNEMENT ENGLACÉ

1. LES CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU

Dans un relief d'amplitude médiocre (dénivellements en général inférieures à 100 m) et peu accusé (pentes moyennes de l'ordre de 5 à 6%), où les vallées constituent les obstacles principaux avec des pentes pouvant dépasser 30%, la glaciation pléistocène a peu modifié la géomorphologie du plateau appalachien. Elle a par

contre abandonné un manteau presque continu de dépôts d'épaisseur variable. Le till, en général mince ou même absent sur les sommets d'interfluvies où il masque plus ou moins une topographie de crêtes et de micro-crêtes rocheuses allongées selon les directions tectoniques, s'épaissit vers le fond des dépressions et des vallées (fig. 2). Dans ces dernières, se retrouvent des stratigraphies complexes associant dépôts fins (limons et argiles lacustres) et grossiers liés aux actions fluvio-glaciaires. Les positions du front glaciaire du Wisconsinien supérieur se remarquent par la présence de chenaux juxtaglaciaires et sousglaciaires ainsi que par une fréquence plus élevée de formes de fonte (kames et terrasses de kame). Les plus grands contrastes granulométriques se localisent donc à proximité des axes principaux de drainage et dans des situations interlobaires (GADD *et al.*, 1972; CLÉMENT et PARENT, 1977).

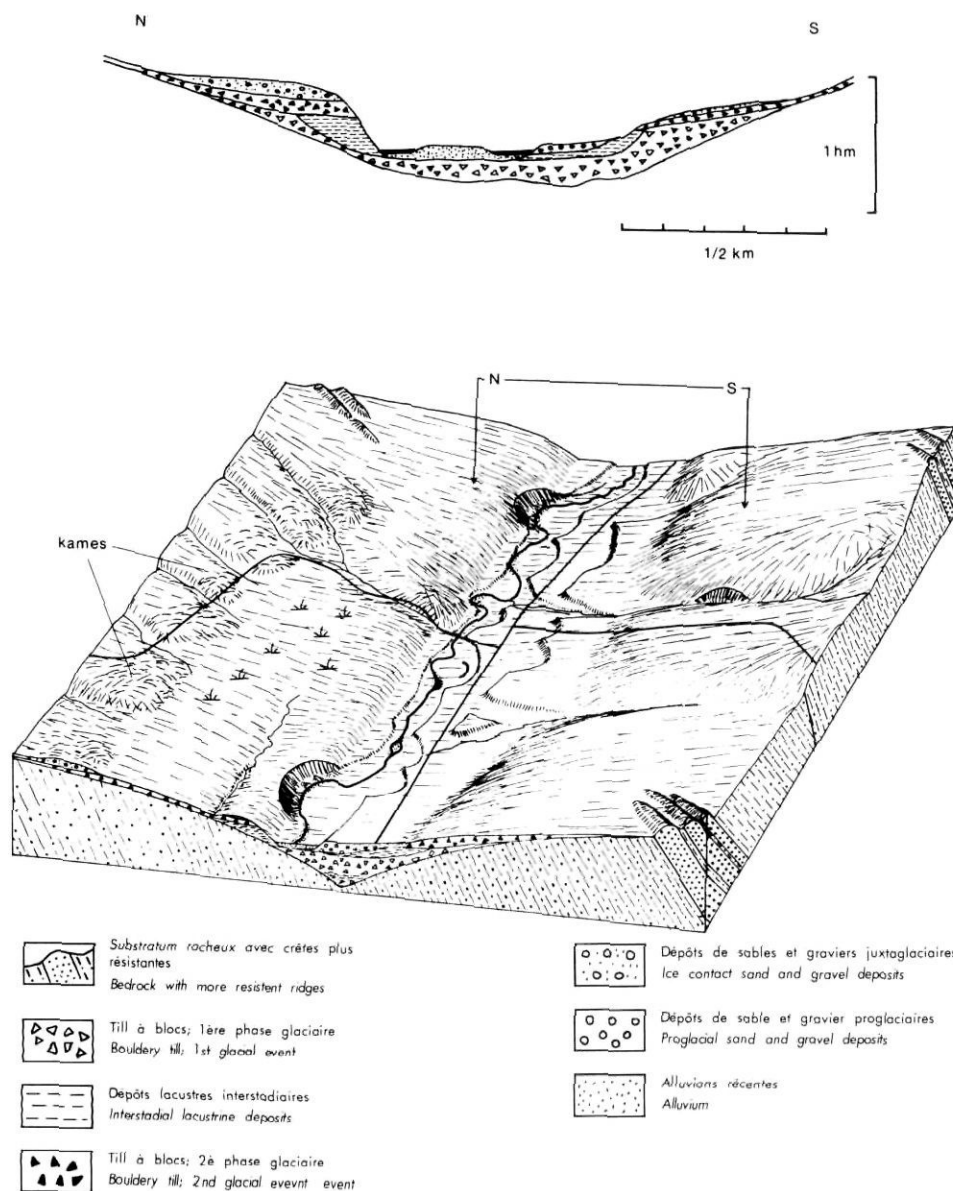


FIGURE 2. Bloc diagramme et coupe stratigraphique des dépôts meubles de la rivière Eaton Nord.

Tridimensional diagram and stratigraphic section of surficial deposits of Eaton Nord River.

Les perturbations apportées au milieu naturel végétal par l'homme, vieilles pourtant de moins de deux siècles, rendent la reconnaissance difficile à toutes les échelles de l'imagerie. L'ancienne forêt mixte a été remplacée par une mosaïque d'espaces cultivés, de friches et de boisés à des stades variés de recolonisation. La part des conifères a été artificiellement accrue pour des raisons économiques. L'utilisation des variations de végétation pour le repérage des sols est donc devenue plus délicate que dans le milieu originel.

L'influence saisonnière complique parfois l'interprétation par suite de l'uniformisation printanière des teneurs en eau des tills et des réactions des surfaces herbeuses soumises à un ensoleillement de latitude moyenne et à un rythme pluviométrique régulier (climat continental océanique). Les meilleures périodes d'observation sont donc surtout l'automne et, dans une certaine mesure, le printemps, la couverture neigeuse hivernale et la nébulosité estivale étant des obstacles importants pour la plupart des capteurs utilisés.

Ces caractéristiques peuvent diminuer, par exemple, le pouvoir discriminatoire des clichés infrarouges couleurs; les possibilités offertes par des outils moins classiques de télédétection peuvent donc être intéressantes. Les secteurs considérés à cet effet font partie de lignes de survol aérien orientées est-ouest entre les agglomérations de Sherbrooke et de La Patrie, à une latitude approximative de 45°20', et effectuées en automne 1977 et au printemps 1978. Les longueurs d'onde enregistrées alors étaient, en plus des bandes du vert, du rouge et du proche infrarouge, l'infrarouge thermique dans la bande 8-14 μm (capteur Deadalus du Centre canadien de télédétection) et le radar dans les bandes X et L (radar à balayage latéral et ouverture synthétique en polarisation HH et HV²).

La résolution des documents est de 3 m environ pour les thermographies et de 2 à 3 m pour les images radar. Celle des photographies est de l'ordre de 1 m.

2. LES FAITS DÉTECTABLES DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE

La distinction des types de dépôts repose sur des critères de drainage interne qui permettent de séparer, entre autres, les dépôts fluvio-glaciaires des tills; parmi ces derniers, on perçoit des différences depuis les placages minces et lessivés sur crêtes rocheuses jusqu'aux tills épais et compacts des secteurs déprimés. Quelques exemples illustrent les limites de leur détection et le lecteur pourra constamment se référer à la photographie panchromatique du secteur d'étude à titre de comparaison (fig. 3).

Les critères sont différents dans les parties boisées et défrichées. Dans les exemples illustrés aux figures 4 et 5, les terrains à drainage rapide correspondent

aux terrasses de kame et aux kames du fond de vallée, ainsi qu'à des placages glaciolacustres jalonnant les bords du plateau appalachien. Les terrains à drainage plus lent sont les cuvettes du plateau et le plancher alluvial des vallées. En situation intermédiaire, les versants recouverts de till limoneux à limono-sableux (classification U.S.D.A.) voient leur écoulement freiné vers l'aval où la granulométrie décroît en général. Le tableau I résume les observations effectuées dans les régions étudiées, ainsi que dans leur voisinage immédiat.

L'interprétation de ces observations appelle plusieurs commentaires. Pour les secteurs couverts de végétation, qui constituent ici la quasi-totalité de la surface, ce n'est qu'au travers du comportement thermique de celle-ci que la nature du sol est déduite. C'est la raison pour laquelle certaines périodes ne permettent pas de distinction, en particulier l'automne pour les surfaces herbacées. Dans ce type de couvert, les variations d'activité chlorophyllienne durant la saison végétative, et particulièrement au printemps, dépendent de l'humidité du sol; les sols sableux, plus secs, entraînent une augmentation de la réflexion du visible et du proche infrarouge, ainsi que de l'émission thermique diurne par rapport aux prairies voisines établies sur sols dérivés de till. Cette dernière tendance est renversée la nuit, mais ses effets sur les thermographies sont masqués par d'autres phénomènes, en particulier les inversions thermiques et les voiles atmosphériques affectant les vallées (LÉVESQUE et BONN, 1979).

Sous forêt, les espaces les mieux drainés se manifestent par une fréquence de feuillus plus élevée. La distinction avec les conifères varie donc selon la saison. En période végétative, la teinte sur les thermographies dépend des couronnes foliacées dont l'émission thermique est plus forte le jour, lorsque l'évapotranspiration est freinée aux heures les plus chaudes. Ces surfaces réfléchissent aussi plus intensément le visible et le proche infrarouge. Les distinctions nocturnes sont par contre peu nettes. Après la chute des feuilles, les espaces de feuillus ne se distinguent pas d'un sol recouvert d'une couche végétale morte (litière fraîche); leur réchauffement diurne est plus rapide ainsi que leur refroidissement nocturne. Il est à noter par ailleurs que leur différenciation d'avec les espaces défrichés recouverts de chaumes peut être difficile de nuit; de jour, les ombres des troncs diminuent les températures et la distinction est aisée. L'inertie thermique des espaces de conifères apparaît par contre plus élevée.

Enfin, la distinction des types de sols sur les surfaces nues, ici le plus souvent des labours, est généralement décevante. En effet, les facteurs les plus déterminants sont, dans l'ordre décroissant, la date du labour et la situation topographique par rapport aux nappes souterraines qui modifient les teneurs en eau superficielles.

Les difficultés évoquées précédemment expliquent que le document le plus utile est l'imagerie infrarouge thermique de jour, surtout en automne. L'éclairage

2. HH: horizontal-horizontal; HV: horizontal-vertical.

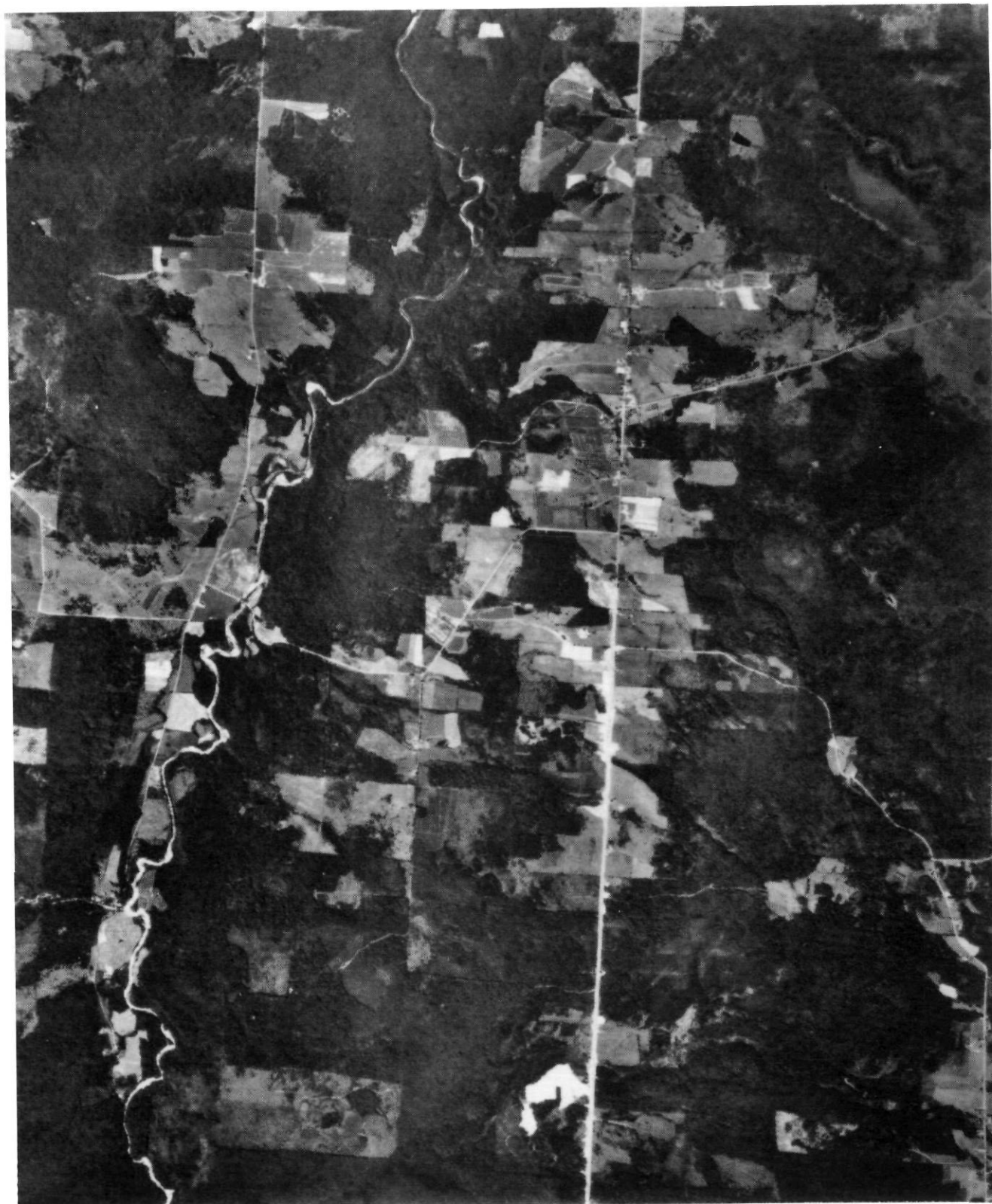


FIGURE 3. Photographie panchromatique noir et blanc de la région à l'étude (Q78340-14, 1/40 000).

Black and white panchromatic photograph of the study area (Q78340-14 at 1 : 40 000).

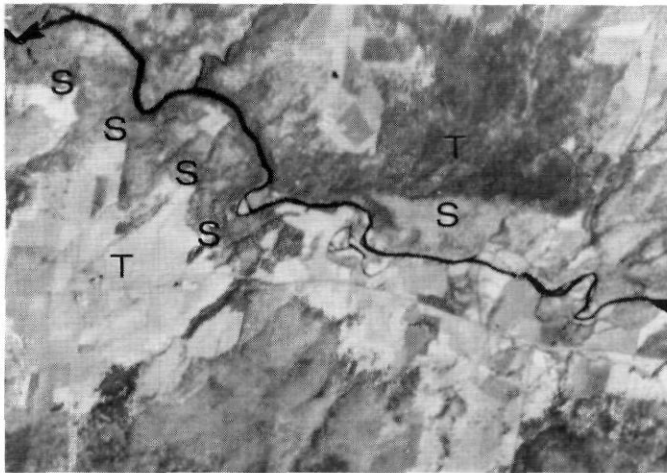


FIGURE 4. Image infrarouge thermique diurne (1978-05-23); S: dépôts sableux caractérisés par des températures plus élevées; T: till caractérisé par des températures plus basses. Se référer à la figure 5 pour l'identification des formes.

Day thermal infrared image (1978-05-23); S: sandy deposits characterized by higher temperatures; T: till characterized by lower temperatures. Refer to figure 5 for the identification of forms.

- | | |
|--|--|
| | Relief local commandé par le substratum rocheux (crêtes et microcrêtes)
Local topography influenced by bedrock (ridges and micro-ridges) |
| | Interfluves à couverture de till
Till covered interfluvies |
| | Dépôts fluvio-glaciaires et glaciolacustres de texture grossière
Coarse textured glaciofluvial and glaciolacustrine deposits |
| | Versants de vallée à stratigraphie complexe affectés de rapements et de mouvement de masse
Valley sides with complex stratigraphy and affected by undercutting and mass movements |
| | Chenal juxtaglaciaire
Ice contact channel |
| | Position supposée du front glaciaire
Inferred position of ice front |
| | Plaine et terrasses alluviales, chenaux fluviaux
Alluvial plain terraces, fluvial channels |

FIGURE 5. Interprétation géomorphologique d'une image infrarouge thermique diurne (1977-10-29).

Geomorphological interpretation of a day thermal infrared image (1977-10-29).

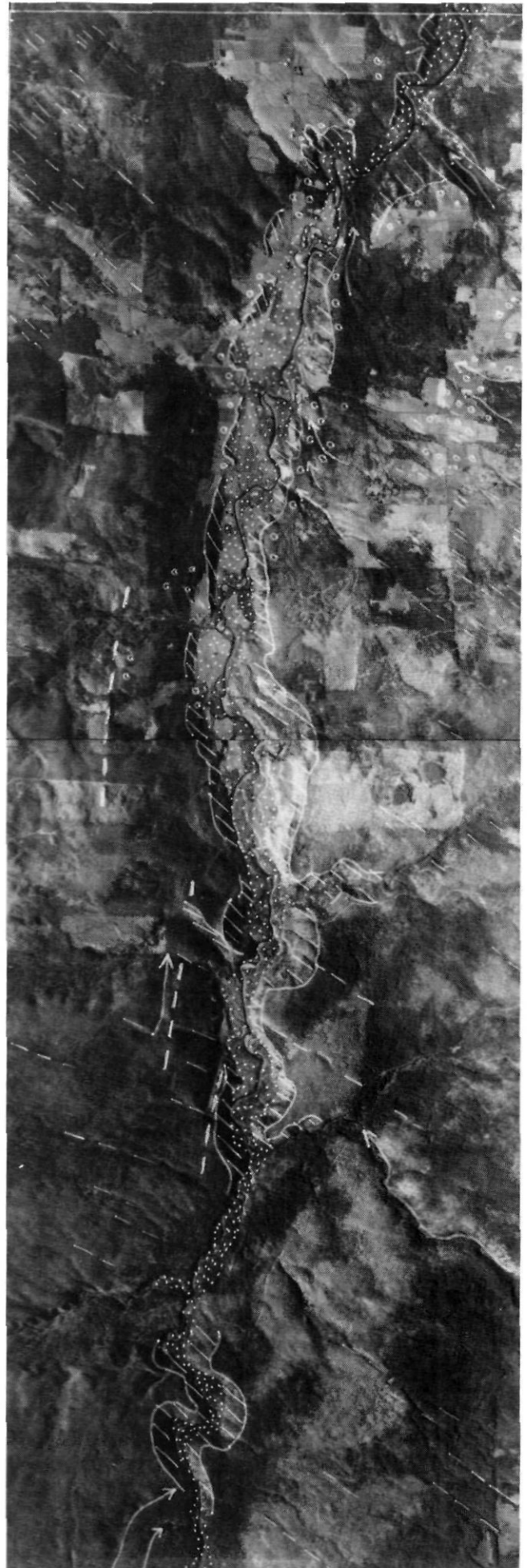


TABLEAU I

Distinction d'unités morphosédimentologiques par l'infrarouge thermique (8-14 μ m) émis par la surface terrestre

Unités	Saison			
	printemps		automne	
	jour	nuit	jour	nuit
1. Secteurs défrichés herbacés				
— sur sols dérivés de till	X	(0)	—	(0)
— sur sols dérivés de dépôts grossiers fluvioglaciaires ou glaciolacustres	0	(X)	—	(X)
2. Secteurs boisés				
— sur sols dérivés de till	X	—	X	0
— sur sols dérivés de dépôts grossiers fluvioglaciaires ou glaciolacustres	0	—	0	X
3. Sols nus (labour)				
— sur sols dérivés de till	0	(0)	—	—
— sur sols dérivés de dépôts grossiers fluvioglaciaires ou glaciolacustres	X	(X)	—	—

Ces unités peuvent être identifiées par des zones plus chaudes «0» et plus froides «X», mais parfois la différence est faible «()» ou il peut y en avoir très peu ou pas du tout «—».

rasant de cette saison ainsi que l'atténuation du filtre de la végétation permettent une exagération des effets de l'insolation. Dans l'exemple de la figure 5, où les axes topographiques sont parallèles ou obliques à la ligne de survol et au parcours du soleil, les contrastes thermiques sont nets sur l'image d'octobre. L'interprétation devient donc surtout géomorphologique et la nature des dépôts de surface est dérivée de cette interprétation combinée aux enseignements des images de nuit et d'autres saisons.

3. LES FAITS DÉTECTABLES DANS L'IMAGERIE RADAR (fig. 6)

Ces faits se rapprochent de ceux qui sont décelables dans les images thermiques diurnes très contrastées, puisque la rugosité du terrain devient le facteur le plus déterminant pour les espaces boisés dans les deux bandes X et L. Les difficultés d'interprétation tiennent aux inégalités de hauteur des surfaces de couronne dues aux coupes forestières. Les contrastes topographiques sont cependant décelables par leur tracé et par la comparaison avec des documents du visible; leur interprétation géomorphologique permet des conclusions du même genre que pour les thermographies diurnes (fig. 4 et 5). Les bandes XHV paraissent plus contrastées et d'utilisation plus aisées dans ce type de terrain. Par contre, l'écho plus intense des surfaces herbeuses dans

les bandes XHH donne un meilleur contraste qui reflète en partie les variations d'humidité. Les surfaces les mieux drainées, telles que les terrasses sablo-graveleuses ou les bordures du plateau, dont les constantes diélectriques sont basses, ont un pouvoir de rétrodiffusion moindre. La très grande richesse de l'information contenue dans le signal radar est cependant mal repré-

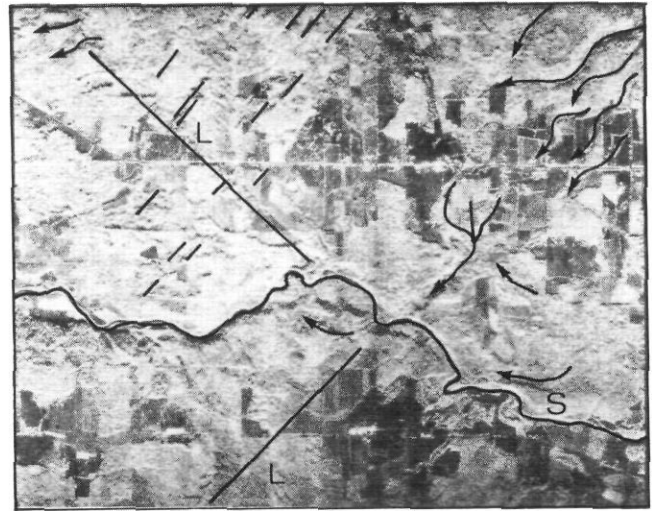


FIGURE 6a. Image radar à ouverture synthétique (1978-11-08): image XHH du secteur de New Mexico. Interfluves commandés par le substratum rocheux (noter les deux linéaments L) et affectés par des chenaux juxtaglaciaires au nord; chenaux glaciolacustres près de la rivière et placages sableux S. Synthetic aperture radar image (1978-11-08): XHH image of New Mexico area. Bedrock influenced interfluves (note the two lineaments L) and affected by in contact channels in the north; glacio-lacustrine channels near the river and sandy veneer S.

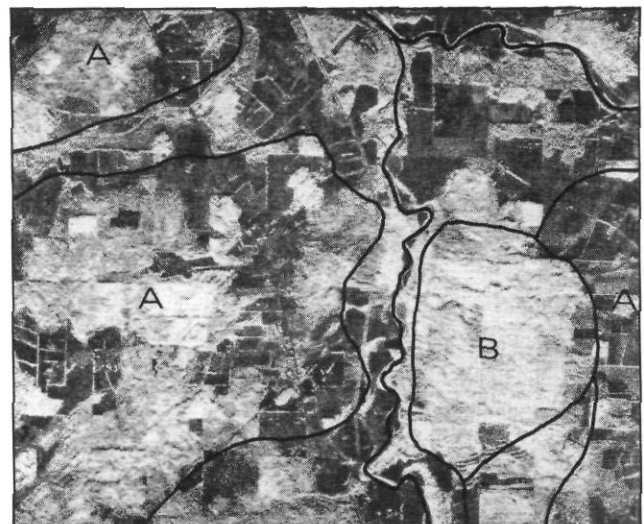


FIGURE 6b. Image radar à ouverture synthétique (1978-11-08): image XHV du secteur de Petit-Lac. A: interfluves commandés par le substratum rocheux; B: chenaux juxtaglaciaires. Synthetic aperture radar image (1978-11-08): XHV image of Petit-Lac area. A: bedrock influenced interfluves; B: in contact channels.

sentée dans les rendus photographiques. De plus, dans la bande L, la forte réflexion des branches des arbres agissant un peu comme des antennes, atténue le détail dans les zones boisées. Cette bande ne paraît donc pas apporter de renseignements abondants, sauf en ce qui concerne le substratum rocheux et les formes majeures résultant de la glaciation, comme, par exemple, les chenaux juxtaglaciers. Des observations similaires ont été faites par PARRY et al., (1980), en bordure du Bouclier canadien dans la région de Saint-Jérôme.

Ces observations confirment que l'interprétation plus fine des images radar requiert une numérisation des documents ou un traitement par isodensités, après séparation des ensembles d'utilisation du sol.

4. CONCLUSIONS DE L'ANALYSE VISUELLE

Dans le type de milieu décrit ici, l'imagerie la plus efficace est obtenue par l'émission thermique diurne aux périodes où les effets de l'insolation sur la topographie sont maximaux et où ceux des écarts d'albédo sont réduits. Ceci explique la netteté des images d'automne. L'interprétation est essentiellement géomorphologique.

L'imagerie radar n'apporte que des faits complémentaires à cette interprétation, si on se limite à une analyse visuelle.

Les images thermiques de nuit, qui devraient théoriquement dégager des surfaces de comportement homogène par leur inertie thermique, sont d'utilisation limitée ici à cause des effets masquants des inversions thermiques et des variations artificielles de la végétation.

L'interprétation dans un milieu affecté par les activités humaines est rendue plus délicate par l'empreinte marquante de l'utilisation du sol et exige une bonne connaissance du type de terrain.

Les moyens utilisés ici sont des outils complémentaires à l'analyse plus classique des photos aériennes; ils permettent de préciser les observations et d'ajouter des renseignements surtout en terrain boisé où l'information contenue dans le visible est souvent peu discriminante en saison végétative et même non végétative (effet des ombres portées dans les forêts de feuillus).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PROSPECTIVE

Au cours des années 80, de nouveaux satellites d'étude des ressources terrestres seront mis sur orbite. En ordre chronologique, il s'agit de :

— Landsat-D (U.S.A., 1983) aura une résolution spatiale de 30 m (contre 80 m pour les Landsat précédents) et sept bandes spectrales au lieu de quatre, dont une (TM5 : 1,55-1,75 μm) est particulièrement sensible à la teneur en eau des feuilles et une autre (TM6 : 2,08-2,35 μm) est sensible à l'altération des minéraux, en particulier des feldspaths. Des études préliminaires de simulation Landsat-D sont en cours à l'université de Sherbrooke (BONN et CLICHE, 1981).

— SPOT (France, 1984) aura une résolution spatiale de 10 m en mode panchromatique et de 20 m en mode multispectral (3 canaux) et l'orientation commandée des capteurs permettra une vision stéréoscopique des mêmes secteurs à partir de deux orbites successives.

— Radarsat (Canada, 1990) sera équipé d'un radar à ouverture synthétique en bande C, particulièrement sensible à l'humidité des sols. Un programme de simulation aéroporté canado-européen est actuellement en cours et les premières images sont en voie de traitement. Bien qu'il soit principalement destiné à la surveillance opérationnelle des glaces dans l'Arctique à cause de son insensibilité aux nuages, les applications terrestres semblent prometteuses en géomorphologie, si les problèmes complexes de traitement numérique des images radar peuvent être résolus d'ici là, de façon à pouvoir isoler les facteurs reliés à la constante diélectrique des matériaux meubles.

Il est évident que pour pouvoir utiliser au maximum ces nouveaux documents pour l'étude des dépôts meubles, il faudra ajouter à l'éventail des analyses sédimentologiques un certain nombre de mesures telles que la chaleur spécifique, la constante diélectrique ou la rugosité de surface des terrains étudiés. Mais les gains de temps réalisés, ainsi que les connaissances nouvelles sur les relations sol-végétation-atmosphère qui seront acquises par l'utilisation de ces nouveaux capteurs valent probablement la peine d'entreprendre un effort méthodologique dans ce sens.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le fonds F.C.A.C. du Québec (EQ-102) et le C.R.S.N.G. (projet A6043) pour leur aide financière, les étudiants du Laboratoire de télédétection de l'université de Sherbrooke pour la prise de mesures sur le terrain, ainsi que le Centre canadien de télédétection pour son assistance dans les survols et le traitement des données. Nous remercions aussi Nicole Carrette et Pierre Richard pour leur avis critique.

RÉFÉRENCES

- BEAUBIEN, J. (1979): La télédétection et la foresterie au Québec, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. I et II, F. Bonn, édit., p. 53-57.
- BERNIER, M. et BONN, F. (1979): Le concept d'inertie thermique en télédétection, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. I et II, F. Bonn, édit., p. 75-84.
- BERNIER, M. (1981): *Utilisation du concept d'inertie thermique dans la différenciation de l'humidité des sols du Québec*, Mémoire de maîtrise, Dép. de géographie, Univ. de Sherbrooke, 180 p.
- BONN, F., BERNIER, M. et BROCHU, R. (1981): Construction et interprétation d'une image d'inertie thermique à partir de données aéroportées, 7^e *Symposium canadien de télédétection*, C.A.S.I. Winnipeg, p. 286-293.
- BONN, F. et CLICHE, G. (1981): Une étude préliminaire de l'information spectrale de la bande Thematic Mapper 5

- (1,55-1,75 μm) par simulation aéroportée de Landsat-D, *Colloque international sur les signatures spectrales*, ISP, Avignon, p. 315-322.
- CAILLEUX, A. et TRICART, J. (1963) : *Initiation à l'étude des sables et des galets*, C.D.U., Paris, 369 p.
- CIHLAR, J. (1979) : La télédétection appliquée aux sols, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. I et II, F. Bonn, édit., p. 15-27.
- CLÉMENT, P. et PARENT, M. (1977) : Contribution à l'étude de la déglaciation wisconsinienne dans le centre des Cantons de l'Est. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 31, n° 3-4, p. 217-228.
- CLÉMENT, P. et BONN, F. (1979) : Étude comparée de différentes techniques de télédétection appliquées à la géomorphologie, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. I et II, F. Bonn, édit., p. 85-96.
- ESTES, J.E., MEL, M.R. et HOOPER, J.O. (1977) : Measuring Soil Moisture with an Airborne Imaging Passive Microwave Radiometer, *Photogrammetric Engineering*, vol. 43, n° 10, p. 1273-1284.
- EZRA, E., BONN, F. et ESTES, J. (1982) : The feasibility of thermal inertia mapping for detection of perched water-tables in semiarid irrigated lands, *Remote sensing of arid and semiarid lands thematic conference*, Environmental Research Inst. of Michigan, Ann Arbor, p. 697-708.
- GADD, N. McDONALD, B.C. et SHILTS, W.N. (1972) : *Deglaciation of Southern Quebec*, Geological Survey of Canada, Paper 71-47, 19 p.
- GIRARD, C.M. et GIRARD, M.C. (1975) : *Applications de la télédétection à l'étude de la biosphère*, Masson, Paris, 360 p.
- IDSO, S.B. et EHRLER, W.L. (1976) : Estimating Soil Moisture in the Root Zone of Crops: a Technique Adaptable to Remote Sensing, *Geophysical Research Letters*, vol. 3, p. 23-25.
- KAHLE, A. (1977) : A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by Remote Sensing, *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, n° 11, p. 1673-1680.
- LADOUCEUR, G. (1978) : *Séréogrammes de la végétation agricole au Québec sur pellicule couleur infrarouge*. Dép. de photogrammétrie, Univ. Laval, 54 p.
- LÉVESQUE, J. et BONN, F. (1979) : Thermographie et micro-climatologie : application aux gelées nocturnes, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. I et II, F. Bonn, édit., p. 181-195.
- PARRY, J.T. (1973) : *The role of AN/APS-94D x-Band SLAR in terrain analysis*, Defence Research Board of Canada, Contract S-2-7090163, Serial 2SP3-0024, 118 p.
- (1980) : Drainage on multiband radar imagery in the Laurentian area, Québec, Canada, *Photogrammetria*, vol. 35, p. 179-198.
- PEAKE, W.H. et OLIVER, T.L. (1971) : *The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies*, Ohio State Univ. Electroscience Lab., 2440-7, Tech. Rep. AFAL-TR-70-301, Columbus, Ohio.
- PRICE, J. (1977) : Thermal inertia mapping : A new view of the earth, *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, p. 2582-2590.
- ROCHON, G., AUDIRAC, H., LARRIVÉE, A., BEAUBIEN, J. et GIGNAC, P. (1979) : Correction radiométrique des effets topographiques sur des Images Landsat de territoires forestiers, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. I et II, F. Bonn, édit., p. 151-162.
- ROCHON, G. et ROKSANDIC, M. (1981) : Intégration des données topographiques aux images Landsat pour la cartographie géologique, in, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. III, F. Bonn, édit., p. 125-137.
- SABINS, F. (1978) : *Remote Sensing, Principles and Interpretation*, Freeman Press, San Francisco, 426 p.
- STRAHLER, A.H., COGAN, T.L. et BRYANT, N.A. (1978) : Improving Forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating Topographic information, *Proc. 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Environmental Research Inst. of Michigan, Ann Arbor, p. 927-942.
- ULABY, F.T., BATLIVALA, P. et DOBSON, M.C. (1978) : Microwave Backscatter Dependence on Surface roughness, soil moisture and soil texture, *IEEE Transactions on Geoscience electronics*, vol. GE16, n° 4, p. 285-295.
- VAN VIJCK, (1963) : *Physics of Plant Environment*, North-Holland Publ., New York, 382 p.